中国生态农业学报 2016 年 5 月 第 24 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2016, 24(5): 590−599

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151064

沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响*

胡广荣[1] 王 琦[1**] 宋兴阳[1] 李富春[1] 张登奎[1]
张恩和[2] 刘青林[2] 王鹤龄[3]

(1. 甘肃农业大学草业学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院 兰州 730070;
3. 甘肃省气候变化与减灾重点实验室/中国气象局兰州干旱气象研究所 兰州 730020)

摘 要 为寻求半干旱地区垄沟集雨环保的沟覆盖材料, 改善土壤水分和温度状况, 提高降雨资源利用效率, 采用完全随机设计大田试验, 以玉米和高粱作为供试作物, 以沟无覆盖作为对照, 研究垄沟集雨不同沟覆盖方式(无覆盖、液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖)对土壤温度、土壤水分、作物产量、水分利用效率等的影响。结果表明, 与沟无覆盖相比, 液体地膜和生物可降解地膜覆盖种植玉米的沟中作物全生育期表层(0~25 cm)土壤温度分别提高 0.2 ℃和 1.0 ℃, 种植高粱的沟中表层土壤温度分别提高 0.2 ℃和 1.1 ℃, 秸秆覆盖种植玉米和高粱的沟中表层土壤温度分别降低 1.1 ℃和 1.3 ℃; 液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖 0~140 cm 土壤贮水量种植玉米分别提高 0.4 mm、21.5 mm 和 8.6 mm, 种植高粱分别提高 2.3 mm、21.0 mm 和 10.9 mm。液体地膜覆盖和生物可降解地膜覆盖玉米青贮产量分别提高增加 0.4%和 10.4%, 玉米籽粒产量分别增加 1.6%和 11.3%, 玉米地上生物量分别增加 0.7%和 7.3%; 高粱青贮产量分别增加 0.2%和 10.9%, 高粱籽粒产量分别增加 1.1%和 11.8%, 高粱地上生物量分别增加 1.6%和 9.4%; 秸秆覆盖的玉米青贮产量、玉米籽粒产量、玉米地上生物量、高粱青贮产量、高粱籽粒产量和高粱地上生物量分别减少 2.9%、2.2%、1.9%、0.7%、1.4%和 1.0%。液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖种植玉米的水分利用效率分别提高 0.9 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$、0.5 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$ 和 4.9 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$, 种植高粱分别提高 0.3 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$、0.4 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$ 和 2.7 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$。综合分析表明, 生物可降解地膜适宜作为半干旱黄土高原区垄沟集雨沟覆盖材料。

关键词 垄沟集雨 沟覆盖材料 土壤温度 土壤水分 可降解地膜 液体地膜 秸秆覆盖 玉米 高粱
中图分类号: S273.1; S513; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0590-10

Effects of furrow-mulching materials on soil temperature, crop yield and water use efficiency in ridge-furrow rainwater harvesting systems*

HU Guangrong[1], WANG Qi[1**], SONG Xingyang[1], LI Fuchun[1], ZHANG Dengkui[1], ZHANG Enhe[2], LIU Qinglin[2], WANG Heling[3]

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction in Gansu Province / Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

Abstract To find suitable environmental protection mulching materials of crop cultivation, improve soil temperature and soil moisture, and to increase rainwater resource utilization in semiarid regions in Northwest China, a randomized complete design

* 国家自然科学基金项目(41461062, 41161090)资助
** 通讯作者: 王琦, 主要从事干旱区农作物节水研究。E-mail: wangqigsau@gmail.com
胡广荣, 主要从事干旱区农作物节水研究。E-mail: hugr2020@163.com
收稿日期: 2015-09-30 接受日期: 2016-01-22
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41461062, 41161090).
** Corresponding author, E-mail: wangqigsau@gmail.com
Received Sep. 30, 2015; accepted Jan. 22, 2016

field experiment was conducted. The experiment determined the effects of different furrow mulching methods (no-mulching, liquid film mulching, straw mulching, biodegradable film mulching, and no mulching as the control) on soil temperature, soil moisture, crop yield (maize and sorghum) and water use efficiency (WUE) in western hilly region of the Loess Plateau. The results showed that compared with no mulching, top soil (0–25 cm) temperature at furrow bottom profile increased by 0.2 ℃ and 1.0 ℃, respectively, for liquid film mulching and biodegradable film mulching during maize growing season, and by 0.2 ℃ and 1.1 ℃ during sorghum growing season. It also decreased by 1.1 ℃ and 1.3 ℃ for straw mulching during maize and sorghum growing seasons, respectively. Soil water storage increased by 0.4 mm, 21.5 mm and 8.6 mm for liquid film mulching, straw mulching and biodegradable film mulching during maize growing seasons, respectively. It also increased by 2.3 mm, 21.0 mm and 10.9 mm for the three mulching modes during sorghum growing season, respectively. Maize silage yield increased by 0.4% and 10.4% for liquid film mulching and biodegradable film mulching, respectively. Then maize grain yield increased by 1.6% and 11.3% and aboveground dry matter increased by 0.7% and 7.3% under the two mulching modes, respectively. Sorghum silage yield increased by 0.2% and 10.9% for liquid film mulching and biodegradable film mulching, respectively. Then sorghum grain yield increased by 1.1% and 11.8% and aboveground dry matter increased by 1.6% and 9.4% under the two mulching modes, respectively. Whereas, under straw mulching condition, the silage yield, grain yield and aboveground dry matter decreased, respectively, by 2.9%, 2.2% and 1.9% for maize planting, and decreased by 0.7%, 1.1% and 1.0% for sorghum planting, respectively, compared with those under no-mulching treatment. The WUE of maize increased by 0.9 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$, 0.5 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$ and 4.9 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$, respectively, and sorghum WUE increased by 0.3 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$, 0.4 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$ and 2.7 $kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$, respectively, under liquid film mulching, straw mulching and biodegradable film mulching modes, compared with those under the control. Based on the results of crop yield, WUE and environmental protection benefits, the biodegradable film was a suitable furrow mulching material in ridge-furrow rainwater harvesting systems in the semiarid Loess Plateau regions.
Keywords Ridge-furrow rainwater harvesting; Furrow mulch material; Soil temperature; Soil moisture; Biodegradable film; Liquid film; Straw mulching; Maize; Sorghum

甘肃省定西黄土高原区水资源匮乏，潜在蒸散量大，积温不足，是全国贫困区之一[1−2]。该区位于中国半干旱区中心地带，属温带大陆性季风气候，降水年际变频大和年内分配不均，冬春降雨量较少，夏秋降雨量较多，多数降雨<5 mm，无法被作物吸收利用。土壤肥力层浅薄、降雨量不足、人类对土地过度开发等使该地区出现植被稀疏、土壤退化等现象[3−4]。该区域地下水埋藏较深和矿化度较高，不宜于人畜饮用和农牧业灌溉[5]。自然环境条件薄弱和稳定性差导致该区域农业生产力低而不稳，尤其近些年出现春寒、干旱、暴雨、冰雹、风灾等极端气象[6]。收集降雨、减少地表径流和蒸发损失、提高降水资源利用效率成为提高农牧业生产力的重要措施。

为提高农牧业生产力和解决粮食安全生产等问题，当地农民采用多种措施抵御干旱、水土流失、春寒等问题，包括修梯田、淤堤坝、挖鱼鳞坑、垄沟集雨覆盖等技术[7−8]。垄沟集雨覆盖技术结合保护性耕作和覆盖技术，垄覆盖作为集雨区，沟覆盖或无覆盖作为种植区，垄面和沟面降雨集中用于沟面，垄产生径流与沟内降雨进行叠加，将无效降雨(<5 mm)变为有效降雨(>5 mm)，促进降水入渗，从而提高降雨资源利用效率[9−10]。沿等高线修筑垄和沟拦截降雨，阻止降雨从高地势向低地势流动，增加降雨在沟内滞留时间，从而提高降雨入渗和减缓水土流失[11−12]。Al-Seekh 和 Mohammad[13]研究表明，与传统平作相比，等高集雨耕作措施的径流量和沉积量分别减少 65%~85%和 58%~69%，等高集雨耕作措施显著提高土壤含水量和延长自然植物生育期，干旱和半干旱地区的土壤含水量增加效果明显高于半湿润地区。垄沟覆盖材料通过降低土壤与大气的水热交换，从而提高土壤含水量和土壤温度，促进作物出苗和生长发育，提高作物产量和水分利用效率(WUE)[14]。Ren 等[15]研究表明，与平作无覆盖相比，垄沟集雨覆盖种植的耕层(0~5 cm)土壤温度提高 1.0~1.2 ℃，玉米(*Zea mays*)籽粒产量提高 11.2%~82.8%，WUE 提高 9.5%~77.4%。Li 等[16]研究结果表明，在半湿润地区，与平作无覆盖相比，沟覆普通地膜和沟覆生物可降解地膜的表层土壤温度分别增加 2.4 ℃和 2.1 ℃，玉米籽粒产量分别提高 35.2%和 34.7%，WUE 分别提高 30.6%和 30.2%；沟覆玉米秸秆的表层土壤温度降低 1.7 ℃，玉米籽粒产量和 WUE 分别提高 33.6%和 28.6%。

垄沟集雨覆盖技术将部分土地面积用于收集径流，从而减少作物种植面积和相对种植密度。李凤民等[17]研究结果表明，垄沟集雨地膜覆盖技术显著增加作物生长前期土壤含水量和表层土壤温度，促进作物前期根系生长；但在作物生长后期，尤其开

花期，随气温增高和降雨量减少，土壤水分限制作物根、茎和叶同化产物向作物生殖器官运移，造成作物前期蒸散量较大和生长过旺，后期作物严重缺水，导致作物减产。国内外关于垄沟集雨种植技术覆盖材料多采用普通地膜[18]。普通地膜是一种人工合成的分子结构非常稳定的聚乙烯、聚氯乙烯等高分子材料，在自然条件下不易通过细菌、酶等生物方式降解，难以直接回收[19]。近年来，随垄沟集雨覆盖技术的推广，普通地膜覆盖产生大量残留，引起白色污染，残留地膜不利于农机耕作和作物生长，引起土壤透气性、土壤动物和微生物数量下降，限制土壤水分和养分运移，阻碍作物根系正常生长，导致土壤质量下降和作物减产，尤其对采食动物健康造成威胁[20−23]，从而限制该地区农牧业可持续发展。近年来，随生物可降解地膜、光降解地膜、光–生物降解地膜等环保型材料的出现，这些新型环保材料对半干旱区覆盖农牧业可持续发展带来新生机[24]。国内外垄沟集雨种植研究多采用普通地膜作为覆盖材料，利用生物可降解地膜和光降解地膜作为覆盖材料的研究相对较少，尤其在半干旱地区。在半干旱区垄沟集雨系统耕作模式下，本文研究了不同沟覆盖方式(覆盖材料)对土壤温度、土壤贮水量、作物青贮产量、籽粒产量和 WUE 的影响，为选择高效集雨、保墒、环保无污染的覆盖材料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2013 年 3—10 月在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地(35°33′N, 104°35′E，海拔 1 896.7 m)进行，该区地处黄土高原西部丘陵区，属半干旱雨养农业区，雨热同季，气候干燥，属典型温带大陆性季风气候。年平均气温 6.7 ℃，年均≥0 ℃积温 2 933.5 ℃，年均≥10 ℃积温 2 239.1 ℃，年平均日照时数 2 433 h，年平均降雨量 383.8 mm，降雨量较低且分布不规则，经过对 1971—2012 年气象数据统计，5—10 月降雨量占全年降雨量的 86.9%；蒸发强烈，年潜在蒸发量(1 531 mm)是年均降雨量的 4.0 倍；无霜期约为 140 d (变化范围为 99~183 d)[25]。试验地地势平坦，表层土壤为重壤土，田间持水量为 25.6%，凋萎系数为 6.7%。试验区 0~40 cm 土层土壤全氮、全磷、全钾和有机质平均含量分别为 0.90 $g\cdot kg^{-1}$、1.65 $g\cdot kg^{-1}$、23.59 $g\cdot kg^{-1}$ 和 11. 76 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮、速效磷和速效钾平均含量分别为 54.3 $mg\cdot kg^{-1}$、14.8 $mg\cdot kg^{-1}$ 和 245 $mg\cdot kg^{-1}$。

1.2 试验设计

试验以‘沈单 16 号’玉米和‘天粱 3 号’高粱(*Sorghum bicolor*)为供试作物。采用田间垄沟集雨种植技术，各处理垄宽为 45 cm，垄上覆盖生物可降解地膜作为集雨区；沟宽为 60 cm，沟覆盖不同生物可降解材料作为种植区。根据当地垄沟集雨种植经验，垄坡度约 40°，垄高度为 20 cm，垄沿等高线修筑，垄长 10 m，种植示意图见图 1。试验采用完全随机设计，2 作物类型为玉米和高粱，3 个沟覆盖材料分别为液体地膜、秸秆和生物可降解地膜，以沟无覆盖作为对照，共设 8 个处理(2 种供试作物×4 种沟覆盖方式)，重复 3 次。生物可降解地膜生产于德国 BASF 化工厂，基料为淀粉和其他生物材料，来源于玉米秸秆和其他可再利用原材料，厚度为 0.008 mm，宽度为 1.4 m。秸秆采用当地燕麦秸秆，覆盖量为 9 $t\cdot hm^{-2}$。将燕麦秸秆铡成 5~10 cm 长的碎段，一次性均匀覆盖在沟内，然后撒 4~5 $t\cdot hm^{-2}$ 碎土覆于秸秆上，以免秸秆被风吹走。液体地膜生产于北京

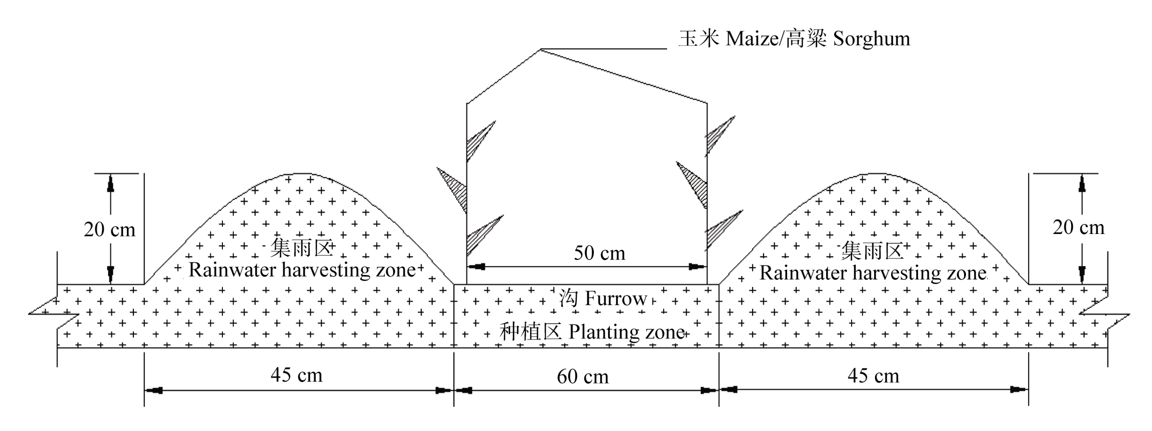


图 1 垄沟集雨种植玉米或高粱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ridge-furrow rainwater harvesting system for maize or sorghum production

金尚禾生物科技有限公司。在喷施之前，将粉状液体地膜与水按 1∶15 混合，混合液搅拌 5~10 min，粉状液体地膜充分溶解后，用喷雾器将混合液均匀喷施于沟土壤表面。粉状液体地膜喷施量为 90 $kg\cdot hm^{-2}$(混合液施用量为 1 440 $kg\cdot hm^{-2}$)，使用寿命约为 60~90 d。

1.3　种植管理

2013 年试验前试验地连续种植 6 a 马铃薯，2012 年马铃薯收获后，对试验地分别进行 1 次翻地和耱地。玉米和高粱播种 7 d 前(2013 年 4 月 13 日)进行整地、划分小区、起垄和覆膜。根据当地施肥经验，施加 420 $kg\cdot hm^{-2}$ 过磷酸钙和 220 $kg\cdot hm^{-2}$ 尿素作为基肥，播种前(2013 年 4 月 19 日)将 2 种肥料混合撒在土壤表面，然后翻入土壤，施肥深度 20~30 cm。2013 年 4 月 20 日穴播播种玉米和高粱，各试验小区分别有 3 条沟和 4 条垄，每条沟面积为 6 m^2 (长 10 m× 宽 0.6 m)，每个试验小区的播种面积 18 m^2(3 条沟面积)。玉米播种密度 5.25×10^4 株$\cdot hm^{-2}$，播种深度 3~5 cm，行距 50 cm，株距 32 cm，每条沟种植 2 行玉米，每个试验小区种植 6 行玉米。高粱播种密度 1.05×10^5 株$\cdot hm^{-2}$，播种深度 3~5 cm，行距 50 cm，株距 15 cm，每条沟种植 2 行高粱，每个试验小区种植 6 行高粱。玉米和高粱播种完成后，为了保护土壤水分，即刻在种植沟内覆盖生物可降解地膜、秸秆和喷施液体地膜。在玉米和高粱生育期，液体地膜喷施 2 次，喷施时间分别为 4 月 22 日和 6 月 28 日。玉米和高粱整个生育期不施追肥和灌溉，采用人工除草，禁止人为踩踏垄和破坏垄覆盖材料，除草时间分别为 2013 年 5 月 10 日、6 月 15 日和 7 月 23 日。玉米和高粱收获时间分别为 2013 年 10 月 15 日和 10 月 1 日。玉米和高粱收获后，将秸秆、生物可降解地膜和液体地膜残留翻耕埋入土壤，埋入深度为 20~30 cm。

1.4　样品采集和测定

在玉米和高粱全生育期，用曲管水银地温计测定各处理沟中和垄上不同深度(5 cm、10 cm、15 cm、20 cm 和 25 cm)土壤温度，沟中和垄上土壤温度测定位置居于沟中心和垄弧顶，每隔 5 d 观测 1 次，测定时间分别为 8:00、14:00 和 18:00，将 3 次测得平均值作为当天土壤温度。

在玉米和高粱播种前 1 d(2013 年 4 月 19 日)、收获后 1 d(玉米收获时间为 2013 年 10 月 16 日，高粱收获时间为 2013 年 10 月 2 日)和降雨(降雨量>5 mm)后测定沟中土壤含水量，沟中土壤含水量测定位置居于沟中心。土壤含水量采用烘干法(105 ℃，10 h)测定，测定深度 140 cm，在 0~20 cm 土壤深度，分层深度为 10 cm，在 20~140 cm 土壤深度，分层深度为 20 cm。

土壤贮水量和 WUE 根据以下公式计算[25]：

$$W=\theta\times \mathrm{BD}\times H\times 10 \tag{1}$$

$$\mathrm{ET}=P+R_e\times P\times \frac{h_1}{h_2}+(W_1-W_2) \tag{2}$$

$$\mathrm{WUE}=\frac{\mathrm{GY}}{\mathrm{ET}} \tag{3}$$

式中：W为土壤贮水量；θ为土壤质量含水量(%)；BD为土壤容重($g\cdot cm^{-3}$)，经过实际测定0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm、100~120 cm和120~140 cm深度土壤容重分别为1.27 $g\cdot cm^{-3}$、1.32 $g\cdot cm^{-3}$、1.40 $g\cdot cm^{-3}$、1.45 $g\cdot cm^{-3}$、1.29 $g\cdot cm^{-3}$、1.26 $g\cdot cm^{-3}$、1.24 $g\cdot cm^{-3}$和1.18 $g\cdot cm^{-3}$；H为土壤分层深度(cm)；10为系数；ET为作物蒸散量(mm)；P为玉米或高粱全生育期降雨量(mm)，降雨量数据由中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地自动气象站测定，自动气象站距试验地50~100 m，在ET计算中忽略覆盖物对降雨的截留量；R_e为生物可降解膜垄的平均径流效率，生物可降解膜垄的径流效率随降雨量和降雨强度变化而变化，Wang等[25]对不同集雨垄的径流效率进行分析，集雨垄的径流效率随作物生育期变化而变化，为了简化计算，该试验采用生物可降解膜垄全年径流效率平均值(74%)；h_1和h_2分别为垄宽(cm)和沟宽(cm)；W_1和W_2分别为播种前1 d和收获后1 d测定140 cm土壤深度的土壤贮水量(mm)；WUE为水分利用效率($kg\cdot hm^{-2}\cdot mm^{-1}$)；GY为垄沟集雨种植的玉米和高粱净籽粒产量($kg\cdot hm^{-2}$)。

乳熟期至蜡熟期为玉米和高粱最佳青贮期[26]。在玉米乳熟期至蜡熟期(2013年9月5日)和高粱乳熟期至蜡熟期(2013年8月30日)，每沟选取6株玉米和高粱(每小区选取18株高粱和玉米)测定青鲜草产量。

在玉米成熟期(2013年10月15日)和高粱成熟期(2013年10月1日)，每沟选取6株作物(每小区选取18株玉米和高粱)，将样本放入烘箱在105 ℃杀青1 h，然后在75 ℃烘干至恒重，测定地上生物量(籽粒产量+秸秆产量)，剩余植株用于测定玉米和高粱籽粒产量。净籽粒产量(GY)为小区籽粒产量除以种植面积(沟面积)，籽粒产量为小区籽粒产量除以小区总面积(垄面积+沟面积)。

采用 Microsoft Excel 进行制图和 SPASS 17.0 进行显著性和单因素方差分析。

2　结果与分析

2.1　作物生育期降雨特征

2013 年试验地年降雨量 448.8 mm，与近 43 a (1971—2013 年)平均降雨量 388 mm 相比，2013 年是丰水年。2013 年作物生育期(4 月 20 日—10 月 15 日)日降雨量见图 2。可以看出，作物生育期共降雨 78 次，降雨量为 411.3 mm，其中<5 mm 降雨次数 54 次，降雨量 96.9 mm，占总降雨次数和总降雨量的 69.2%和 23.6%; 5~10 mm 降雨次数 11 次，降雨量 78.9 mm，占总降雨次数和总降雨量的 14.1%和 19.2%; 10~15 mm 降雨次数 5 次，降雨量 61.1 mm，占总降雨次数和总降雨量的 6.4%和 14.9%; 15~20 mm 降雨次数 2 次，降雨量 32.9 mm，占总降雨次数和总降雨量的 2.6%和 8.0%; >20 mm 降雨次数 6 次，降雨量 141.5 mm，占总降雨次数和总降雨量的 7.7%和 34.4%。作物生育期无效降雨(<5 mm 的降雨)次数(54 次)远大于有效降雨(>5 mm 的降雨)次数(24 次)。2013 年作物生育期降雨量分布不规则，4 月、6 月和 10 月的降雨量较小，占作物生育期降雨量的 3.1%、8.8%和 1.3%，5 月、7 月、8 月和 9 月的降雨量较大，占作物生育期降雨量的 16.8%、33.9%、20.7%和 15.5%。>10 mm 降雨次数和降雨量分别占总降雨次数和总降雨量的 16.7%和 57.3%，说明>10 mm 降雨是作物生育期降雨量的主要来源。

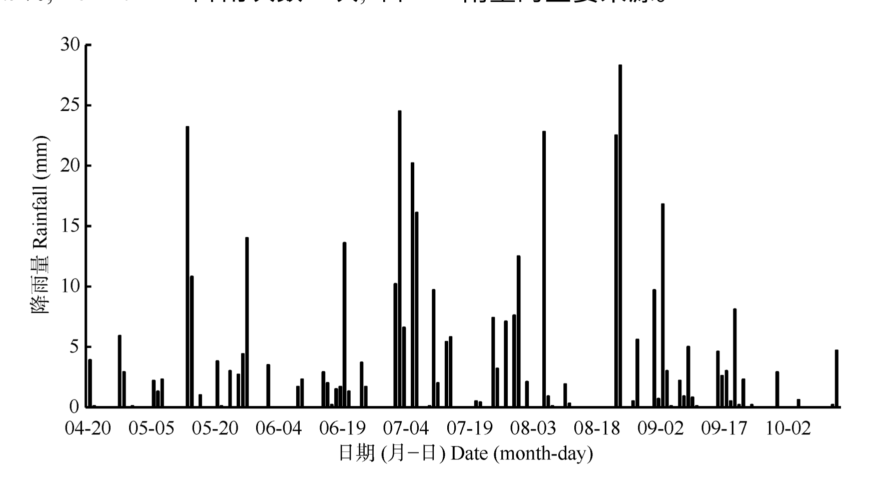


图 2　试验地作物生育期降雨量

Fig. 2　Rainfall during crop growing seasons at the experiment site

2.2　沟覆盖材料对土壤温度的影响

各处理沟和垄的表层(0~25 cm)土壤温度随作物(玉米和高粱)生育期的变化如图 3 所示。不同处理沟中表层土壤温度差异较明显，垄表层土壤温度差异不明显。在作物生长前期，作物冠层较小，沟中和垄上表面直接接收太阳辐射，垄沟集雨种植技术在作物生长前期对土壤温度影响较大，尤其在苗期；不同处理沟中表层土壤温度差异随作物生育期延伸和作物冠层增大逐渐减小，尤其在 9 月上旬后，随气温下降和覆盖材料降解，不同覆盖材料的土壤温度差异逐渐消失。连续降雨或大暴雨后，不同处理表层土壤温度差异不明显，例如 7 月 7—12 日连续降雨量为 52.4 mm，降雨后 24 h 测定土壤温度，在玉米种植中，无覆盖、液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖沟中土壤温度分别为 19.1 ℃、19.2 ℃、18.8 ℃和 19.3 ℃，垄中土壤温度分别为 19.9 ℃、20.7 ℃、20.0 ℃和 19.5 ℃；在高粱种植中，无覆盖、液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖的沟中土壤温度分别为 19.0 ℃、19.0 ℃、18.8 ℃和 19.2 ℃，垄中土壤温度分别为 19.4 ℃、20.0 ℃、19.1 ℃和 19.7 ℃。就玉米全生育期平均表层(0~25 cm)土壤温度而言，与无覆盖相比，液体地膜覆盖和生物可降解地膜覆盖的沟中土壤温度分别提高 0.2 ℃和 1.0 ℃，秸秆覆盖的沟中土壤温度降低 1.1 ℃；就高粱全生育期平均表层(0~25 cm)土壤温度而言，液体地膜覆盖和生物可降解地膜覆盖的沟中土壤温度分别提高 0.2 ℃和 1.1 ℃，秸秆覆盖的沟中土壤温度降低 1.3 ℃。覆盖材料对高粱种植沟中土壤温度影响类似于玉米种植，生物可降解地膜覆盖增温明显，秸秆覆盖降温明显，液体地膜覆盖具有较小增温作用。通过观察，玉米冠层明显高于高粱冠层，玉米遮光效应高于高粱，但玉米冠层对表层土壤温度的影响与高粱冠层类似。

2.3　沟覆盖材料对土壤贮水量的影响

各处理沟中土壤贮水量随降雨、土壤温度、土壤蒸发和作物蒸腾等变化而变化(图 4)。在作物生长前期(作物播种后 0~30 d)，气温较低、降雨量较少，作物生长较慢，不同处理的土壤贮水量之间差异不

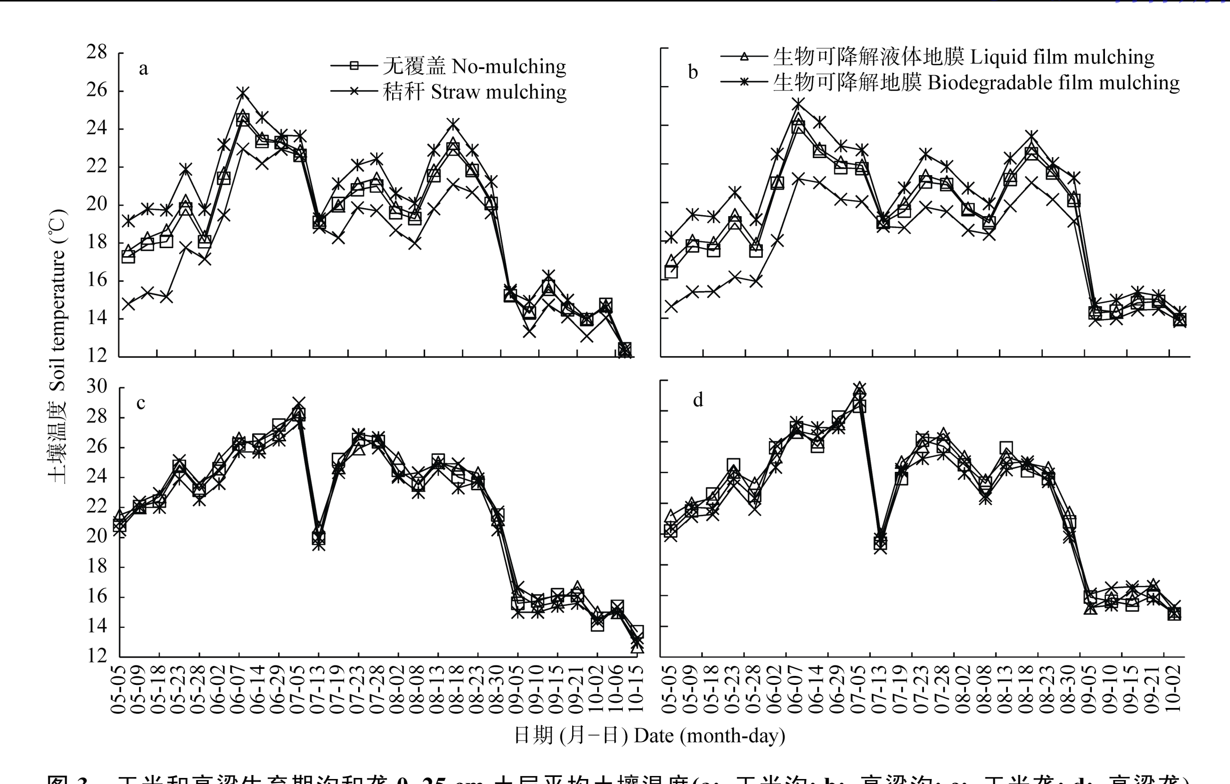


图 3　玉米和高粱生育期沟和垄 0~25 cm 土层平均土壤温度(a: 玉米沟; b: 高粱沟; c: 玉米垄; d: 高粱垄)

Fig. 3　Average soil temperature in 0–25 cm soil depth at furrow bottoms and ridge tops under various treatments during maize and sorghum growing seasons (a: maize furrow; b: sorghum furrow; c: maize ridge top; d: sorghum ridge top)

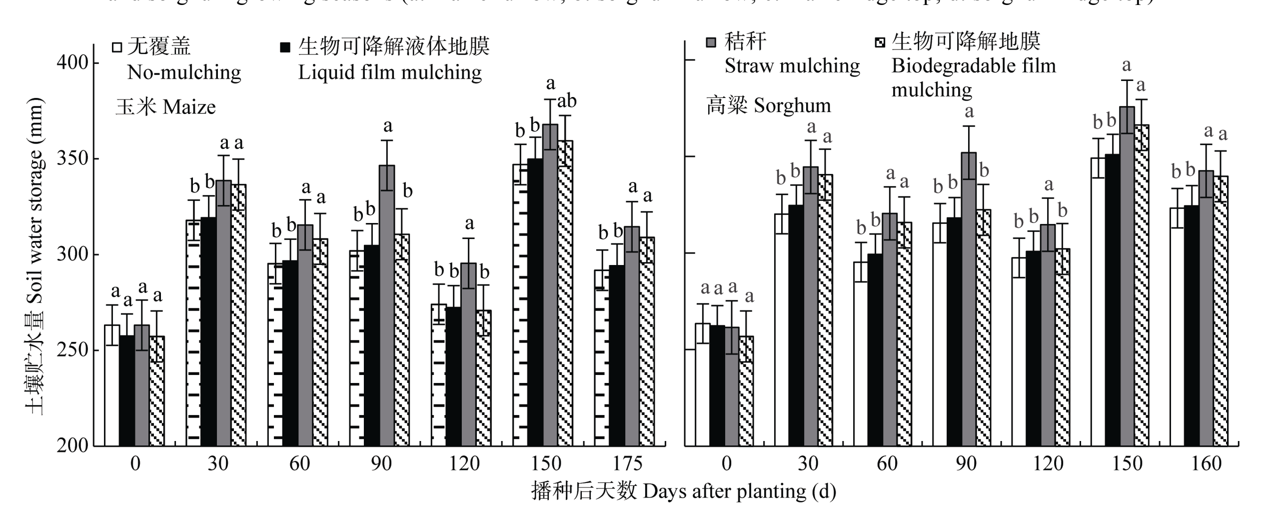


图 4　沟覆盖材料对玉米和高粱生育期 0~140 cm 土层土壤贮水量的影响

Fig. 4　Effects of furrow mulching materials on soil water storage in 0–140 cm soil depth at furrow bottoms during maize and sorghum growing seasons

不同小写字母表示同一观测日期不同处理之间差异显著($P<0.05$). Different small letters indicate significant difference at 0.05 level among different treatments at the same day after planting.

显著。2012 年冬季(10—12 月)和 2013 年春季(1—3 月)降水量分别为 19.4 mm 和 6.1 mm，较少降水量使作物播种期土壤贮水量处于最低。秋季较高降雨量使作物蜡熟期和成熟期的土壤贮水量处于全生育期最高。在大多数作物生长期，秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖的土壤贮水量显著高于无覆盖和液体地膜覆盖，秸秆覆盖与生物可降解地膜覆盖之间、无覆盖与液体地膜覆盖之间相差不显著。就作物全生育期土壤贮水量平均值而言，在玉米种植中，与无覆盖相比，液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖的 0~140 cm 土壤贮水量分别提高 0.4 mm、21.5 mm 和 8.6 mm；在高粱种植中，液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖的 0~140 cm 土壤贮水量分别提高 2.3 mm、21.0 mm 和 10.9 mm。覆盖材料能够减少作物棵间土壤无效蒸发，尤其是秸秆覆盖，秸秆覆盖降低土壤表层温度，作物生长较

慢和蒸散量较小，土壤贮水量较高。与无覆盖相比，液体地膜覆盖提高土壤贮水量不明显；生物可降解地膜覆盖减少作物棵间土壤蒸发，作物生长较快和蒸散量较高，土壤贮水量低于秸秆覆盖。

2.4 沟覆盖材料对作物青贮产量和籽粒产量的影响

从表 1 可以看出，就青贮产量而言，生物可降解地膜覆盖的玉米青贮产量显著高于无覆盖和液体地膜覆盖，无覆盖和液体地膜覆盖的玉米青贮产量显著高于秸秆覆盖，无覆盖与液体地膜覆盖之间相差不显著；生物可降解地膜覆盖的高粱青贮产量显著高于无覆盖、秸秆覆盖和液体地膜覆盖，无覆盖与秸秆覆盖和液体地膜覆盖之间相差不显著。就籽粒产量和地上生物量而言，生物可降解地膜覆盖的玉米(或高粱)籽粒产量和地上生物量显著高于无覆盖、液体地膜覆盖和秸秆覆盖，无覆盖与液体地膜覆盖和秸秆覆盖之间差异不显著。与无覆盖相比，液体地膜覆盖和生物可降解地膜覆盖的玉米青贮产量分别增加 0.4%和 10.4%，籽粒产量分别增加 1.6%和 11.3%，地上生物量分别增加 0.7%和 7.3%；高粱青贮产量分别增加 0.2%和 10.9%，籽粒产量分别增加 1.1%和 11.8%，地上生物量分别增加 1.6%和 9.4%。秸秆覆盖的玉米青贮产量、玉米籽粒产量、玉米地上生物量、高粱青贮产量、高粱籽粒产量和高粱地上生物量分别减少 2.9%、2.2%、1.9%、0.7%、1.4%和 1.0%。生物可降解地膜覆盖提高土壤含水量和土壤温度，缩短作物生长时期，有利于作物早期发育及产量的形成，从而提高玉米和高粱的青贮产量、籽粒产量和地上生物量。虽然秸秆覆盖具有较高土壤含水量，但降低了表层土壤温度，不利于作物种子发芽和苗期生长，推迟作物生育期，导致作物青贮产量、籽粒产量和地上生物量降低。液体地膜覆盖保水和保温效果低于生物可降解地膜覆盖，降解速度快于生物可降解地膜覆盖，其增产效果不明显。

表 1 沟覆盖材料对作物(玉米和高粱)青贮草量、籽粒产量、地上生物量、收获指数、蒸散量和水分利用效率(WUE)的影响

Table 1 Effects of furrow mulch materials on silage yield, grain yield, aboveground biomass, harvest index, evapotranspiration and water use efficiency (WUE) of maize and sorghum

作物 Crop	覆盖材料 Furrow mulch material	青贮产量 Silage yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	籽粒产量 Grain yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	地上生物量 Biomass yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	收获指数 Harvest index	蒸散量 ET (mm)	WUE ($kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$)
玉米 Maize	无覆盖 No-mulching	18 360±189.3b	9 644±255.6b	20 022±327.9b	0.48±0.02a	610.9±9.7a	31.6±0.8b
	液体地膜 Liquid film	18 430±309.3b	9 795±231.1b	20 165±236.7b	0.49±0.01a	603.0±7.9a	32.5±0.8b
	秸秆 Straw	17 827±236.3c	9 429±77.5b	19 638±240.6b	0.48±0.01a	588.2±4.5b	32.1±0.3b
	生物可降解地膜 Biodegradable film	20 269±232.2a	10 733±313.6a	21 485±292.3a	0.50±0.01a	587.9±10.4b	36.5±0.7a
高粱 Sorghum	无覆盖 No-mulching	10 479±302.3b	4 658±161.0b	11 310±216.8b	0.41±0.02a	571.2±10.7a	16.3±0.8b
	液体地膜 Liquid film	10 504±274.8b	4 595±214.9b	11 492±239.4b	0.40±0.01a	568.9±12.9a	16.6±0.8b
	秸秆 Straw	10 407±615.5b	4 708±111.8b	11 194±718.8b	0.42±0.02a	550.0±9.2b	16.7±0.6b
	生物可降解地膜 Biodegradable film	11 622±572.4a	5 209±187.9a	12 370±187.9a	0.42±0.01a	548.1±5.2b	19.0±0.4a

同列数据后不同字母表示差异显著(P<0.05)。Different small letters in the same column mean significant difference at $P < 0.05$.

收获指数是作物收获时经济产量(籽粒产量)与地上生物产量(籽粒产量+秸秆产量)之比，是评价作物群体光合同化物转化能力的重要指标，该指标反映碳素从源器官光合产物转运到库器官的比例。收获指数受遗传基因、栽培措施、外界环境等条件制约。垄沟集雨覆盖种植中，不同沟覆盖材料的籽粒产量和地上生物产量之间的差异显著，但不同沟覆盖材料的收获指数差异不显著。

2.5 沟覆盖材料对蒸散量和水分利用效率的影响

蒸散量(土壤蒸发+植物蒸腾)受地表辐射、空气温度、土壤热通量、大气压强等因素的影响，是陆面生态系统水文循环过程的重要组成部分，是作物生长发育重要水分和能量来源。就作物(玉米和高粱)全生育期而言，无覆盖和液体地膜覆盖的蒸散量显著高于生物可降解地膜覆盖和秸秆覆盖，无覆盖与液体地膜覆盖之间、生物可降解地膜覆盖与秸秆覆盖之间差异不显著，不同处理蒸散量排列次序为无覆盖≈液体地膜覆盖>生物可降解地膜覆盖≈秸秆覆盖。

在垄沟集雨种植中，WUE 指作物净籽粒产量与田间耗水率的比值[25]，是反映作物水分吸收利用效率的重要指标。提高降水资源利用效率成为甘肃省黄土高原区农业可持续发展的核心问题。覆盖材料改变作物棵间土壤蒸发量和表层土壤温度，进而影响土壤含水量、作物生长状况和作物耗水量。就作物全生育期 WUE 而言，生物可降解地膜覆盖的

WUE 显著高于无覆盖、液体地膜覆盖和秸秆覆盖, 无覆盖与液体地膜覆盖和秸秆覆盖之间差异不显著; 在玉米种植中, 与无覆盖相比, 液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖的 WUE 分别提高 0.9 $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$、0.5 $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ 和 4.9 $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$; 在高粱种植中, 液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖的 WUE 分别提高 0.3 $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$、0.4 $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$ 和 2.7 $kg \cdot hm^{-2} \cdot mm^{-1}$。玉米各处理的平均 WUE 是高粱的 1.9 倍。

3　讨论

垄沟集雨种植技术结合保护性耕作和覆盖技术, 对土壤温度的影响随土壤类型、气候条件、覆盖材料、地表植被和作物生育期的变化而变化。在沟覆盖材料中, 生物可降解地膜透光性好, 透气性差, 减少土壤与大气层之间的水分和能量交换效果明显, 增温效果较好; 液体地膜是一种高分子有机化合物, 兑水喷洒土壤表面, 在土壤表面形成多分子的网状膜, 封闭土壤表面孔隙, 胶结土壤颗粒, 减少土壤水分蒸发, 但其易降解和易被外力损坏, 增温效果较差; 秸秆具有较低透光性和较高光反射率, 其透光性差和导热率较低, 拦截部分太阳直射和热辐射, 大部分光源无法达到土壤表面, 从而降低表层土壤温度。本研究结果表明, 与无覆盖相比, 液体地膜覆盖和生物可降解地膜覆盖种植玉米的沟中全生育期表层(0~25 cm)土壤温度分别提高 0.2 ℃和 1.0 ℃, 种植高粱分别提高 0.2 ℃和 1.1 ℃, 秸秆覆盖种植玉米和高粱的沟中表层土壤温度分别降低 1.1 ℃和 1.3 ℃; 在作物幼苗期, 作物冠层较小, 沟覆盖材料接收太阳辐射较多, 不同沟覆盖材料表层土壤温度差异明显; 随作物生育期延伸, 作物冠层逐渐增大, 沟覆盖材料接收太阳辐射较少, 不同沟覆盖材料表层土壤温度差异逐渐减小。夏自强等[27]研究发现, 与无覆盖相比, 在作物生长前期普通地膜覆盖增温效果明显(3.8~4.7 ℃), 秸秆覆盖降温效果明显(3.8~5.5 ℃); 在作物生长后期, 普通地膜覆盖增温效果不明显(0.7~2.0 ℃), 秸秆覆盖降温效果不明显(0.2~0.6 ℃)。本研究中, 玉米和高粱生育期, 生物可降解地膜覆盖 1 次, 液体地膜喷施 2 次, 观察显示, 生物可降解地膜和液体地膜开始降解时间分别为 65~75 d 和 40~50 d。秸秆纤维素含量较高, 在自然状态下降解速度较慢, 在作物收获期仍有部分秸秆未降解。作物生育前期, 不同沟覆盖材料的表层土壤温度差异明显, 随降雨、气温下降和覆盖材料降解, 不同覆盖材料的土壤温度差异逐渐消失。就作物全生育期平均表层土壤温度而言, 与无覆盖相比, 生物可降解地膜覆盖和液体地膜覆盖具有增温作用, 生物可降解地膜覆盖增温效果高于液体地膜覆盖, 秸秆覆盖具有降温作用。

垄沟集雨沟覆盖材料在地表形成隔层, 减少土壤水分向大气蒸发, 将水分保持在土壤中供作物生产利用, 达到高效用水节水的目的。传统耕作条件下, 高强度降雨和暴雨, 直接冲击土壤表层和破坏土壤团粒结构, 减小土壤孔隙度和降雨入渗强度[28]。地表覆盖减少降水对地表直接冲击, 维护土壤团粒结构稳定性和土壤疏松多孔等特性, 增加降雨入渗强度, 提高降水利用效率。垄沟集雨种植技术能够收集垄上产生的径流, 使其与沟中降雨进行叠加, 将无效降雨转变为有效降雨, 促进降雨入渗和减少作物棵间土壤无效蒸发, 提高作物耕层土壤含水量。随作物生育期延伸, 液体地膜和生物可降解地膜逐渐降解, 其保水效果随之减弱[29–30]。就作物全生育期土壤贮水量平均值而言, 与无覆盖相比, 液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖种植玉米 0~140 cm 土壤贮水量分别提高 0.4 mm、21.5 mm 和 8.6 mm, 种植高粱分别提高 2.3 mm、21.0 mm 和 10.9 mm。

随我国半干旱黄土高原区农牧业发展和人们对奶肉产品等需求增加, 青贮玉米和高粱日益受到人们的重视。青贮玉米和高粱的最佳收获期为乳熟后期–蜡熟前期, 此时青贮产量最高, 且营养价值最好, 把新鲜粮饲兼用玉米和高粱填入密闭的青贮窖或青贮塔内, 经过微生物发酵作用, 达到长期保存饲料和保持饲料青绿营养多汁的目的。青贮发酵作用可以把适口性差、质地粗硬、木质素含量高的饲草变成柔软多汁、气味酸甜芳香、适口性好的粗饲料[26]。垄沟集雨种植覆盖减少土壤水分蒸发, 增加作物蒸腾, 促进干物质积累, 将土壤水分物理消耗(无效消耗)转化为生理消耗(有效消耗), 从而提高作物产量和 WUE。秸秆覆盖降低表层土壤温度, 引起作物根系生理生化(生长、吸收功能、运输功能、内源激素)代谢功能变化, 使作物生育期延迟和灌浆期缩短, 最终造成作物青贮产量和籽粒产量降低[31–32]。本研究结果表明, 与无覆盖相比, 液体地膜覆盖和生物可降解地膜覆盖显著增加玉米和高粱的青贮产量、籽粒产量、地上生物量, 秸秆覆盖减少了玉米和高粱的青贮产量、籽粒产量和地上生物量。

秸秆和生物可降解地膜阻碍土壤与大气间水热交换, 减少作物棵间土壤无效蒸发效果明显, 液体地膜减少作物棵间土壤无效蒸发效果不明显。垄沟集雨种植改变地表微地形, 形成径流收集区和降水

入渗区，增加地表截流，延长地表径流滞留时间，从而促进种植区富集降雨和降雨入渗，提高降水资源利用效率。朱国庆等[33]研究结果显示，与平作无覆盖相比，垄沟集雨种植春小麦籽粒产量提高17.6%~72.8%，WUE 提高 3.05 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。Ren 等[15]研究结果显示，与平作无覆盖相比，当降雨量为 230 mm、340 mm 和 440 mm 时，垄沟集雨种植春玉米籽粒产量分别增加 83%、43%和 11%，WUE 分别提高 77%、43%和 10%，垄沟集雨种植的玉米籽粒产量增长率随降雨增加而减少。本研究显示，与无覆盖相比，液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖种植玉米的水分利用效率分别提高 0.9 kg·hm^{-2}·mm^{-1}、0.5 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和 4.9 kg·hm^{-2}·mm^{-1}，种植高粱分别提高 0.3 kg·hm^{-2}·mm^{-1}、0.4 kg·hm^{-2}·mm^{-1}和 2.7 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。本试验观察显示，该区域 6 月中旬进入雨季，在作物生长前期，液体地膜和生物可降解地膜与普通地膜具有类似保水、增温和增产效果，在作物收获后，无需人工回收，具有省时、省力、无污染等优点，有利于环境保护，但经济成本和耐久性等特点待进一步研究。

4 结论

本研究结果表明，生物可降解地膜增温效果明显，液体地膜增温效果不明显，秸秆覆盖具有降温效果。作物全生育期沟中土壤贮水量排列次序为无覆盖<液体地膜覆盖<生物可降解地膜覆盖<秸秆覆盖。与无覆盖相比，液体地膜覆盖和生物可降解地膜覆盖玉米青贮产量分别增加 0.4%和 10.4%，玉米籽粒产量分别增加 1.6%和 11.3%，玉米地上生物量分别增加 0.7%和 7.3%；高粱青贮产量分别增加 0.2%和 10.9%，高粱籽粒产量分别增加 1.1%和 11.8%，高粱地上生物量分别增加 1.6%和 9.4%，秸秆覆盖的玉米青贮产量、玉米籽粒产量、玉米地上生物量、高粱青贮产量、高粱籽粒产量和高粱地上生物量分别减少 2.9%、2.2%、1.9%、0.7%、1.4%和 1.0%。液体地膜覆盖、秸秆覆盖和生物可降解地膜覆盖种植玉米的水分利用效率分别提高 0.9 kg·hm^{-2}·mm^{-1}、0.5 kg·hm^{-2}·mm^{-1} 和 4.9 kg·hm^{-2}·mm^{-1}，种植高粱分别提高 0.3 kg·hm^{-2}·mm^{-1}、0.4 kg·hm^{-2}·mm^{-1} 和 2.7 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。从作物产量、水分利用效率、环保等考虑，生物可降解地膜覆盖适宜作为半干旱黄土高原区垄沟集雨沟覆盖材料。

参考文献 References

[1] Wang Q, Song X Y, Li F C, et al. Optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-mulching material for Alfalfa production in rainwater harvesting in semi-arid regions of China[J]. Field Crops Research, 2015, 180: 186–196

[2] 任祥, 王琦, 张恩和, 等. 覆盖材料和沟垄比对燕麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 945–954
Ren X, Wang Q, Zhang E H, et al. Effects of mulching materials and furrow-to-ridge ratios on oat grain/hay yield and water use efficiency under rainwater harvesting cultivation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 945–954

[3] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 904–909
Zhao Q Y, Zhang W, Wang S G, et al. Change of extreme precipitation events in arid and semi-arid regions in the east of northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 904–909

[4] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部生态环境变化与对策建议[J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 314–319
Qin D H, Ding Y H, Wang S W, et al. Ecological and environmental change in West China and its response strategy[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(3): 314–319

[5] 霍海丽, 王琦, 张恩和, 等. 不同集雨种植方式对干旱区紫花苜蓿种植的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2770–2778
Huo H L, Wang Q, Zhang E H, et al. Effects of different water harvesting modes on alfalfa planting in semi-arid areas of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2770–2778

[6] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205–210
Wang J, Li F M, Song Q H, et al. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 205–210

[7] Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. Field Crops Research, 1999, 63(1): 79–86

[8] Liu C A, Jin S L, Zhou L M, et al. Effects of plastic film mulch and tillage on maize productivity and soil parameters[J]. European Journal of Agronomy, 2009, 31(4): 241–249

[9] Deng X P, Shan L, Zhang H P, et al. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/3): 23–40

[10] 韩娟, 廖允成, 贾志宽, 等. 半湿润偏旱区沟垄覆盖种植对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(1): 101–109
Han J, Liao Y C, Jia Z K, et al. Effects of ridging with mulching on yield and water use efficiency in winter wheat in semi-humid drought-prone region in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(1): 101–109

[11] 尹国丽, 贠旭疆, 师尚礼, 等. 半干旱区沟垄集雨种植对紫花苜蓿出苗及草产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2010, 45(1): 111–115

Yin G L, Yun X J, Shi S L, et al. Effects of rainfall harvesting cultivation with ridges and furrows on emergence and grass yield of alfalfa in semiarid areas[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2010, 45(1): 111–115

[12] Li X Y, Xie Z K, Yan X K. Runoff characteristics of artificial catchment materials for rainwater harvesting in the semiarid regions of China[J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(3): 211–224

[13] Al-Seekh S H, Mohammad A G. The effect of water harvesting techniques on runoff, sedimentation, and soil properties[J]. Environmental Management, 2009, 44(1): 37–45

[14] Zhang S, Carmi G, Berliner P. Efficiency of rainwater harvesting of microcatchments and the role of their design[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 95: 22–29

[15] Ren X L, Jia Z K, Chen X L, et al. Rainfall concentration for increasing corn production under semiarid climate[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(12): 1293–1302

[16] Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 101–109

[17] 李凤民, 鄢珣, 王俊, 等. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 330–333
Li F M, Yan X, Wang J, et al. The mechanism of yield decrease of spring wheat resulted from plastic film mulching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(3): 330–333

[18] 张杰. 环保型地膜覆盖对土壤环境的影响及玉米生长的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 1–6
Zhang J. Influences of different covering materials mulching on soil environment and response of the corn growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010: 1–6

[19] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269–272
Yan C R, Mei X R, He W Q, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269–272

[20] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 25–30
Shen L X, Wang P, Zhang L L, et al. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 25–30

[21] 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 等. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 14–19
Zhang J, Ren X L, Luo S F, et al. Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 14–19

[22] 张海林, 陈阜, 秦耀东, 等. 覆盖免耕夏玉米耗水特性的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 36–40
Zhang H L, Chen F, Qin Y D, et al. Water consumption characteristics for summer corn under no-tillage with mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 36–40

[23] 杨青华, 韩锦峰, 贺德先, 等. 液体地膜覆盖保水效应研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 29–32
Yang Q H, Han J F, He D X, et al. Study on water-retention effect of liquid film mulching[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(4): 29–32

[24] 李仙岳, 彭遵原, 史海滨, 等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 97–103
Li X Y, Peng Z Y, Shi H B, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 97–103

[25] Wang Q, Ren X, Song X Y, et al. The optimum ridge-furrow ratio and suitable ridge-covering material in rainwater harvesting for oats production in semiarid regions of China[J]. Field Crops Research, 2015, 172: 106–118

[26] 张春原, 杨国航, 王元东, 等. 不同玉米品种的青贮产量和营养品质比较分析[J]. 作物杂志, 2008(3): 38–39
Zhang C Y, Yang G H, Wang Y D, et al. Analysis on silage production and nutritional quality in seven different maize hybrids[J]. Crops, 2008(3): 38–39

[27] 夏自强, 蒋洪庚, 李琼芳, 等. 地膜覆盖对土壤温度、水分的影响及节水效益[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 39–45
Xia Z Q, Jiang H G, Li Q F, et al. Effect of mulch on soil temperature and moisture and analysis of water saving benefit[J]. Journal of Hohai University, 1997, 25(2): 39–45

[28] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41–47

[29] Li X Y, Gong J D, Gao Q Z, et al. Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2001, 50(3): 173–183

[30] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 374–382

[31] Edwards L, Burney J R, Richter G, et al. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 81(3): 217–222

[32] 高亚军, 李生秀. 旱地秸秆覆盖条件下作物减产的原因及作用机制分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 15–19
Gao Y J, Li S X. Cause and mechanism of crop yield reduction under straw mulch in dryland [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(7): 15–19

[33] 朱国庆, 史学贵, 李巧珍. 定西半干旱地区春小麦抑蒸集水抗旱技术研究[J]. 中国农业气象, 2002, 23(2): 17–21
Zhu G Q, Shi X G, Li Q Z. Research on drought-resisting technology of evaporation-inhibiting and rain water harvesting for spring wheat in Dingxi semiarid region[J]. Chinese Journal of Agricultural Meteorology, 2002, 23(2): 17–21